

Detailed Structure of Breaking Wind Waves with Droplet and Bubble Formation (水滴・気泡生成を伴う風波の崩れの細部構造)

著者	小賀 百樹
号	710
発行年	1981
URL	http://hdl.handle.net/10097/24359

氏名・(本籍)	こがももき 小 賀 百 樹
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 710 号
学位授与年月日	昭 和 56 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地球物理学専攻
学位論文題目	Detailed Structure of Breaking Wind Waves with Droplet and Bubble Formation (水滴・気泡生成を伴う風波の崩れの細部構造)
論文審査委員	(主査) 教 授 鳥 羽 良 明 教 授 近 藤 純 正 教 授 田 中 正 之 助 教 授 河 合 三 四 郎

論 文 目 次

Abstract

1. General introduction
2. Direct production of droplets from breaking wind waves — its observation by multi-colored overlapping exposure photographing technique
 - 2.1. Introduction
 - 2.2. Multi-colored overlapping exposure technique (MOET) and wind-wave tank experiment
 - 2.3. Some representative phenomena on and near the surface of breaking wind waves
 - 2.3.1. The appearance of small projection on wave surface

- 2.3.2. Direct production of droplets
- 2.4. Creation mechanism of projections and the condition of wave breaking
- 3. Entrainment of bubbles by wind wave breaking
 - 3.1. Introduction
 - 3.2. Measurement of bubble formation and its distribution
 - 3.3. Simple model experiment for bubble formation associated with wind wave breaking
 - 3.3.1. Modeling and experiment
 - 3.3.2. Results of the model experiment
 - 3.4. Discussion
 - 3.4.1. Bubble formation process in breaking wind waves
 - 3.4.2. Energy dissipation of waves by bubble entrainment
- 4. Spreading process of droplets over breaking wind waves under strong influence of wind
 - 4.1. Introduction
 - 4.2. Air flow distribution over breaking wind waves
 - 4.2.1. Air flow visualization technique by use of styrofoam flakes (SF flake technique) and wind-wave tank experiment
 - 4.2.2. Results of experiment
 - 4.3. Droplet velocity distribution and spreading process of the droplets
 - 4.3.1. Droplet velocity distribution along a representative wave
 - 4.3.2. Spreading process of droplets along wave under influence of wind
 - 4.4. Concluding remarks
- Appendix to chapter 4 : Model of droplet splashing and the distribution of droplet concentration over breaking wind waves
- 5. Characteristics of breaking wind-wave field in the light of individual wind wave concept
 - 5.1. Introduction
 - 5.2. Experiment and analysis
 - 5.2.1. Experimental procedure and conditions
 - 5.2.2. Wave form parameters
 - 5.2.3. Wave types classified by a degree of breaking
 - 5.3. Results

5.3.1. Relation between wave types and wave form parameters

5.3.2. Change of wave form parameters during propagation and relation between wave types

5.3.3. Arrangement of wave types along fetch

5.4. Discussion

5.4.1. Sporadic arrangement of breaking waves and its unsteadiness

5.4.2. Similarity for individual waves of fully breaking

Appendix to chapter 5 : Wave types and similarity for individual waves under a moderate wind without breaking

6. Summary and concluding remarks

Acknowledgments

References

Tables

Figures

論文内容要旨

本研究は、主として微水滴や気泡の生成にかかわる崩れつつある風波の細部構造、並びに風波の崩れの間歇性や崩れ波の散在性について、風洞水槽を用い実験的に調べたものである。論文は6章より成る。第1章は序論である。本研究の主要部分は、第2章から第5章にわたり、ある程度、並列的に記述される。第2章では崩れ波表面の微細な形状と微水滴の直接生成について、第3章では崩れに伴う気泡とり込みとその分散について、第4章では微水滴の飛散過程について、第5章では崩れの間歇性や散在性について述べる。第6章は、まとめ及び結語である。以下に、各章のあらましを記す。

第1章の序論では、本研究がなされるべき背景と意義を明らかにするために、従来の研究の簡単なレビューを行うとともに、本研究の方針とそのあらましを述べる。特に、運動量、水蒸気(潜熱)、気体を含めた物質等の海面境界を通じての交換、あるいは、海面近傍での光の散乱に対する風波の崩れの存在効果の重要性を指摘する。本研究の目的は、海上では測定がきわめて困難な、このような風波の崩れ現象を風洞水槽(水路長 20 m, 幅 0.6 m, 高さ 1.2 m, 水深 0.6 m)で実現し、その崩れ現象の素過程を詳細に測定することである。主な測定は、吹走距離(fetch) 16 mの周辺でなされる。風速条件は、水路断面代表風速 $U_r = 14 \sim 16 \text{ ms}^{-1}$ (まさつ速度 $u_* = 124 \sim 197 \text{ cm s}^{-1}$) である。

第2章では、崩れ波表面の微細な形状とその変化過程を測定した。測定には、今回新たに開発した多色重ね撮り法(Photographic Technique of Multi-colored Overlapping Exposure; 以下 MOET と略す)を用いた。この方法は、異なる色をした複数のストロボを順次発光させ重ね撮りをするものである。重ね撮りされた像の時間前後性は、像の色のちがいによって明瞭に判別される。また、重ね撮りであるので、複雑な形をした映像の時間前後の対応も比較的つけやすい。従来、高速度の変化過程の測定には高速度カメラが使用されているが、今回の MOET では、通常の 35 mm still camera ないし、低速度の cinecamera を用いて、比較的簡易に変化過程を測定することができる。ただし、色調の差で時間前後性をはっきり判別するには、三原色のうちから選択した2色ないし3色の重ね撮りが妥当である。

崩れ波表面の微細な形状に関する特徴的現象は、主として波の峯近くにおける微小突起の出現である。これらの突起は引き伸ばされ、こわれて小さな水滴となる(Fig. 1 参照)。この突起に関する一連の過程は、風波の崩れに伴う微水滴の直接生成に具体的イメージを与えるものである。突起の生成機構としては、気流側のシアの効果を取り入れた Kelvin-Helmholtz 不安定モデル(Miles 1959)が第1次近似として適当であることが示される。

第3章では、風波の崩れに伴う気泡生成とその分散過程について調べた。特に、波の位相に沿った気泡分布と気泡の働きについて、水槽の側面や下方から詳細な写真撮影を行った。その結果、崩れに伴う気泡生成の主な機構は、峯近くの前斜面における、組織的な下向きの流れによる間歇的な気泡とり込みであることが推察された。この推察は、上記の気泡生成過程をモデル化した単純な実験からも支持される。モデル実験は、静止水面に水流を入射させ、気泡を生成・連行させるものである。入射水流速度、角度をいろいろ変え、気泡生成の有無や気泡サイズ・量を調べたところ、現実の崩れ波の場合とよい対応が得られた。加えて、このモデル実験によって、次のことが明らかになった。水流の入射角度や速度には、気泡がまったく取り込まれなくなる臨界条件が存在する。これは、水表面に淀み点を伴う収れんする水流分布があっても、必ずしも気泡とり込みが起こるとはかぎらないことを示している。すなわち、風波表面に、位相速度を越す流れがあり淀み点が存在しても、気泡とり込みには、さらに表面張力や重力に打ち勝つためのもう一つの段階が必要であることを示唆している。

第4章では、風波の位相に沿った微水滴の飛散過程について調べた。具体的には、現実の崩れ波の位相に沿って、水滴の飛散速度分布 (Fig. 2) 及び気流分布を測定し、水滴飛散に及ぼす気流の効果を調べた。水滴の飛散速度及び気流可視化用トレーサーとして今回新たに用いた発泡スチロール小片の動きは、先述の写真撮影法 MOET を用いて測定された。その結果、今回測定が可能であった直径 0.8 mm 以上の水滴について言えば、水滴の水平成分の運動は気流による加速効果により、鉛直成分は非粘性運動としてほぼ説明できる。これらの結果をふまえて、Koga & Toba (MS) によって、すでに提出されている水滴飛散モデルの妥当性が吟味される。

加えて、今回の気流可視化の結果は、崩れを伴う風波上の気流分布そのものとしても興味深い。峯の風下側に形成される剝離泡の大きさは、波の谷全体をすっぽりおおうほど大きくない。明らかに小さな周期と波高を持つ個々の波の上で測定された気流分布だけをとり出して求められる平均風速の鉛直プロファイルは、すべての波の上の気流分布から求められる全平均風速プロファイルにくらべて、特異な形をしている。この事実は、全平均プロファイルに見られる波面近くの対数則からのずれ (kink) に強く反映していると考えられる。

第5章では、崩れ波を伴う風波場の特性を、個々の波の崩れの間歇性並びに崩れ波の空間的な散在性を通して調べた。そのために、個々の波を崩れ波場の構成単位としてとらえ、個々の波の崩れの程度 (16mm シネカメラによる) と波形パラメタ (wave form parameters [Fig. 3 参照; 波高記録による]) を同時に測定した。本研究では、波形パラメタとして、波高、周期などの他に、波形のとがりの程度や前後のゆがみの程度を示すパラメタ ($R_1 \sim R_5$) を新たに導入する。その結果、次のことが明らかとなった。

崩れの程度によってタイプ分けされた個々の波 (タイプ 1 ~ 4) は、そのタイプごとに、波形

パラメタやその変化率に顕著な特色をそなえている。特に、吹走距離 (fetch) 方向に伝播する個々の波の波形パラメタの変化傾向から、崩れを伴わない低風波の風波場において Okuda (1980) によって示唆されていたような、個々波の循環過程の存在が推察される。本測定では、循環の周期は個々波の周期の 4 倍を十分越えるものである。崩れの間歇性は、このような循環過程の一側面としてとらえられる。また、個々波の吹走距離方向の並び方については、平均像として、1 ないし 2 個程度の崩れ波が、崩れていない波のあいだに、ところどころにはさまっていることが推察される。

個々波の各タイプごとに波形パラメタに顕著な差があることは、個々波の全体的な相似構造の内部に、こまかく見れば、各タイプに対応する相異なる相似性が存在することを示唆している。特に、 $H-T$ (波高-周期) 相関図上で、タイプ 1 (fully breaking) の波に対して、 $H \propto T^2$ という関係が得られた (Fig. 4)。これは、全体的な個々波に対して提出されている相似関係 $H \propto T^{3/2}$ (Toba 1978, Tokuda 1979) と異なる。また、今回の種々のパラメタを用いて、低風速の崩れを伴わない風波場の個々波の循環過程ないし相似構造を吟味することが可能である。これは、補足実験により示される。

第 6 章は、まとめ及び結語である。特に、本測定が、ま水を用いて行われたこと、あるいは、限られた吹走距離で風波の崩れを実現させるために、比較的高風速下で実験がなされたことについて、現実の海洋での現象との比較において、いくらかの吟味がなされる。

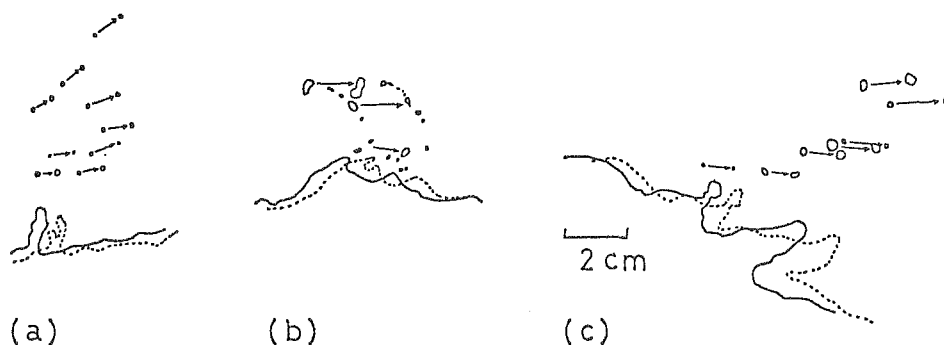


Fig. 1. Pictures of direct production of droplets traced from photographs of MOET (two-color). Thick solid line indicates first time images and dotted line or thin solid line indicates second time images.

(a) Windward slope near to the crest
 $F = 5 \text{ m}$, $U_r = 16 \text{ m s}^{-1}$, $t = 6 \text{ m s}$.

(b) At the crest
 $F = 16 \text{ m}$, $U_r = 16 \text{ m s}^{-1}$, $t = 5 \text{ m s}$.

(c) Leading slope near to the crest
 $F = 9 \text{ m}$, $U_r = 16 \text{ m s}^{-1}$, $t = 5 \text{ m s}$.

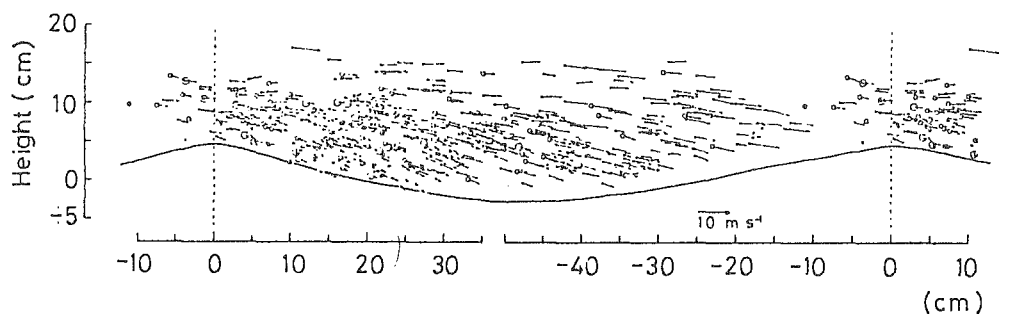


Fig. 2. The droplet velocity distribution along a representative wave ($F = 16 \text{ m}$, $U_r = 16 \text{ m s}^{-1}$). Three kinds of circles indicate droplet size; size 1 (droplet diameter $d = 0.81 \text{ mm} \sim 1.74 \text{ mm}$), size 2 ($1.74 \text{ mm} \sim 3.76 \text{ mm}$) and size 3 ($3.76 \text{ mm} \sim 8.10 \text{ mm}$). Arrows indicate the droplet velocity vector in a coordinate moving with phase speed of wave.

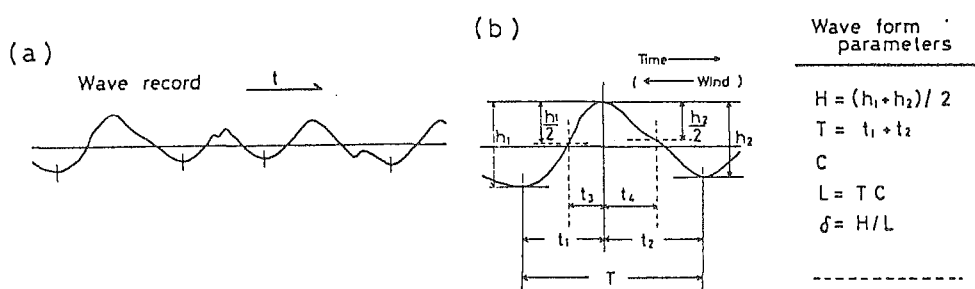


Fig. 3 . Definition of individual waves and wave form parameters.

(a) A wave crest between adjacent two vertical lines is the unit of present analysis and called as an individual wave (zero-crossing trough-to-trough).

(b) Definition of wave form parameters.

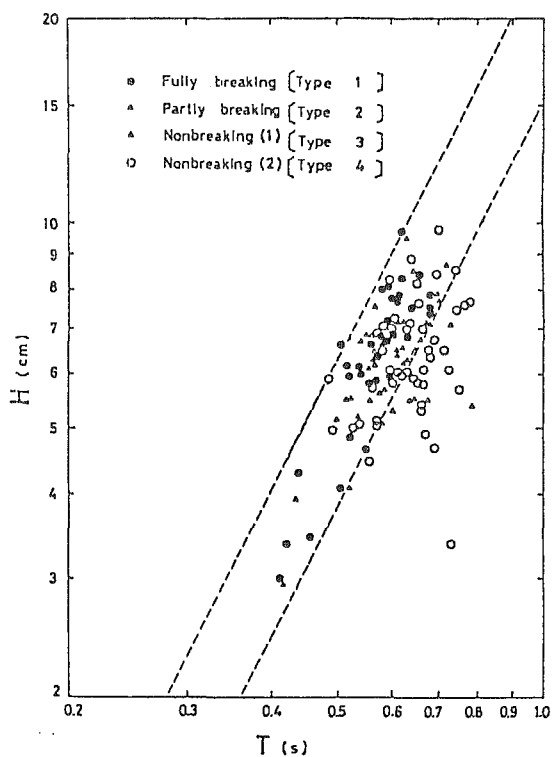


Fig. 4 . Correlations between the wave form parameters. H-T correlation. Dashed lines indicate 2-power law ($H \propto T^2$). Four wave types are differentiated by respective four symbols.

論文審査の結果の要旨

水面上に風が吹くと風波が生ずる。この最初の発生の問題はすでに河合によって解決を見たが、その後の発達を含む風波の力学はいぜんとして多くの困難な要素を含んでいる。風の弱い間は水面は比較的滑らかであるが、風が強くなると水面は粗くなり、さらに波が発達してくると波の表面が崩れて水中には気泡がとり込まれ、水面上には水滴が生ずるようになる。本論文は、この水滴や気泡の生成を伴う風波の崩れの現象について流れの可視化法に属する新しい手段を開発して、これまでなされたことのない細部構造を、風洞水槽を用いて詳細に研究したものである。

流れの可視化による計測のために、本研究では新しく色の異なるストロボを遅延発光させて重ね撮りし、その映像を解析する手段を開発した。これによって、崩れ波表面の微細な形状とその変化、気泡の捕捉、水中の気泡の運動、表面の微小突起の成長とその分解による水滴の生成、および気流中の水滴の加速などの過程の具体的イメージを、はじめて浮かび上げることができた。

気泡生成については、個々の風波の峯のところに波の位相速度を越す流れができ、峯の前斜面に組織的な下向き流れが間歇的に生じて気泡が捕捉されることを示したが、その場合峯の前面によどみ点が生じることと、気泡生成の条件との間には、いま一つの段階が存在することを水流ジェットによるモデル実験事実とあわせて示唆している。

さらに、崩れ波上の気流の分布と、それによる水滴の運動をも測定しているが、特に、風波の谷の上の、通常の測器では測定できなかった部分の流れの構造や、同じ波連でも異なるタイプの個々波の上の気流構造の違いをも見いだすことができた。

最後に崩れの進行過程と個々波の変化サイクルとの関係を追求し、また崩れつつある波だけをとり出した場合、風波の全体的相似性と異なる相似性が存在することを見いだしている。

以上のようにこの研究は海面境界過程の一側面の研究に新しい境地を開き多くの知見を見いだしたもので、申請者が自立して研究を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

よって小賀百樹提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。